



国家重点图书出版规划项目
合 材 料 技 术 丛 书

ADVANCES IN THE BONDED COMPOSITE
REPAIR OF METALLIC AIRCRAFT STRUCTURE

飞机金属结构复合 材料修理技术

A.A. 贝克 (A.A. Baker)

[澳] L.R.F. 罗斯 (L.R.F. Rose) 编

R. 琼斯 (R. Jones)

董登科 丁惠梁 译

航空工业出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目
先进复合材料技术丛书

飞机金属结构复合 材料修理技术

**Advances in the Bonded Composite Repair of
Metallic Aircraft Structure**

A. A. 贝克 (A. A. Baker)

[澳] L. R. F. 罗斯 (L. R. F. Rose) 编

R. 琼斯 (R. Jones)

董登科 丁惠梁 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

《飞机金属结构复合材料修理技术》主要包括：胶结修理的表面处理、胶黏剂的表征及数据库、胶结修理解析方法、数值分析、形状优化、热应力分析、疲劳分析、修理效率研究、损伤容限评估、声疲劳分析、修理的认证、基于损伤容限理念的飞机修理以及大型飞机机体结构损伤容限修理设计技术。书中附有大量的历史应用案例，加强了实用性。

全书结构体系合理、内容充实、理论与案例相结合，有较强的科学性和实用性。可供航空结构领域从事飞机结构分析、设计和后勤维修及保障人员使用，同时可供该专业范围内的生产、使用部门的技术人员和高等院校师生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机金属结构复合材料修理技术/ (澳) A. A. 贝克
(A. A. Baker), (澳) L. R. F. 罗斯 (L. R. F. Rose), (澳)
R. 琼斯 (R. Jones) 编; 董登科, 丁惠梁译. --北京:
航空工业出版社, 2017. 7

(先进复合材料技术丛书)

书名原文: Advances in the Bonded Composite
Repair of Metallic Aircraft Structure
ISBN 978 - 7 - 5165 - 1221 - 0

I. ①飞… II. ①A… ②L… ③R… ④董… ⑤丁…
III. ①飞机—金属复合材料—损伤 (力学)—修理 IV.
①V252

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 134726 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2014 - 3264

This edition of *Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure, Volume 1* (ISBN 9780080426990) by A. A. Baker, L. R. F. Rose, R. Jones is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

飞机金属结构复合材料修理技术
Feiji Jinshu Jiegou Fuhe Cailiao Xiuli Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 7 月第 1 版

2017 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 65.5

字数: 1679 千字

印数: 1—2000

定价: 325.00 元

丛书前言

先进材料是科学技术发展和国民经济建设的重要支柱。先进复合材料作为一类轻质高效、节能环保的新型材料，在先进材料领域具有极其重要的地位。自 20 世纪 60 年代问世以来，先进复合材料始终是世界各国重点研究开发的关键材料之一，近年来更是备受青睐与重视，在世界各国的军民用领域，尤其是航空领域起到了至关重要的作用。先进复合材料的用量已经成为航空结构先进性的重要标志，大型飞机波音 787、空客 A350 的先进复合材料用量达到 50% 以上，展示了其令人鼓舞的发展前景。此外，先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用，向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

国内先进复合材料的发展应用已有 30 多年的历史，在此过程中获取了大量的性能数据，也积累了大量的设计使用经验。目前先进复合材料继续向高性能化、多功能化和尖端化发展，并向民用领域快速渗透和规模扩张，产业进入应用扩张带动成本持续降低的新阶段。为了适应这一发展需求，我们组织国内先进复合材料领域有实际经验的专家，吸取了国外的先进经验，汇总了国内外最新的研发成果，旨在为国内提供一套全面、系统并具有工程应用

价值的“先进复合材料技术丛书”。考虑到目前先进复合材料的规模和成熟程度，“先进复合材料技术丛书”的内容主要针对先进树脂基复合材料，涵盖先进树脂基复合材料技术基础、制造技术、性能表征、使用维护以及适航审定等最新成果。

对于 21 世纪的企业，其成功不仅仅是利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势，而利用拥有的知识带动和促进产业的跨越更是一种挑战和责任。把拥有的知识用书面文字的形式呈现出来，构建一个公共资料库和交流平台，让更多的人从中受益，为产业的跨越提供支撑——这就是中航复合材料有限责任公司、中国复合材料学会和航空工业出版社出版这套“先进复合材料技术丛书”的初衷。

相信这套丛书的出版，会使更多的复合材料科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力我国复合材料产业的自主创新，对复合材料产业的科技进步产生积极影响。

中国工程院院士
中国复合材料学会理事长 陈祥宝
“先进复合材料技术丛书”主编

《飞机金属结构复合材料修理技术》 译校工作委员会

主 任 董登科 丁惠梁

副主任 张 侃 陈先民

成 员 (按姓氏笔画排序)

弓云昭 李宴宾 许 飞 闫文伟 刘秀丽 苏少普

张海英 张文东 党 堃 焦 婷 廖江海 臧伟锋

顾 问 郑旻仲 薛景川 童明波 王俊安 关志东 胡律行

译者序

《飞机金属结构复合材料修理技术》一书主要以澳大利亚学者艾伦·贝克博士、弗兰西斯·罗斯博士和莱丝·琼斯教授编撰的《Advances in the bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure》为主要蓝本，本书中编为 1~42 章；同时收录和编译了 T. swift 的《Reparis to Damage Tolerant Aircraft》和美国空军 USAF 的《Enhancements to Repair Assessment Procedure and Integrated Design (RAPID)》等报告，分别编为附录 1 和附录 2。译者希望通过《飞机金属结构复合材料修理技术》一书，使读者对国外在飞机金属结构修理方面的先进方法和技术进行了解和学习，从而为我国飞机结构设计、分析、维修、试验等方面提供支持。

用复合材料来修理飞机金属结构的概念最早由澳大利亚提出，也是本书的主要内容。这项技术本身并不复杂，通过胶结修理降低开裂区域的应力，阻止裂纹扩展，维持原结构的承力特性。在实验室条件下，此项技术很容易得到验证，而在实际运行环境下，有很多因素会对修理的可靠性产生影响。澳大利亚研究人员认识到，让航空部门及适航认可此项技术，其应用的可靠性验证是重中之重。通过研究，澳大利亚开发了一种结构修理技术，并应用于多个型号飞机结构，通过多年的验证，复合材料胶结修理技术已为国外航空维修领域所采用，并在其他领域也有新的拓展。

“十一五”以来，我国国内航空事业蓬勃发展，多个型号飞机相继首飞，并投入使用，而后续的飞机结构维修问题也成为了现阶段的研究热点之一。《Advances in the bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure》中包括了来自澳大利亚国防科学技术组织、美国空军、美国 Sandia 实验室、英国国防评价与研究机构、加拿大国家航空实验室等多个研究机构关于复合材料胶结修理飞机金属结构的研究成果，全面介绍了有关修理的关键技术，包括材料和工艺、修理设计、认证以及应用的考虑等，并引用了多达 13 个型号飞机的应用案例，来说明复合材料胶结修理的可靠性，从而使复合材料胶结修理为航空界及适航部门所接受。《Reparis to Damage Tolerant Aircraft》和《Enhancements to Repair Assessment Procedure and Integrated Design (RAPID)》等文章从损伤容限理念出发，对飞机金属结构的修理技术以及修理后的评估进行了系统地介绍，并以波音飞机机身结构为应用案例进行了分析和验证。

于此，译者认为《飞机金属结构复合材料修理技术》一书能够为飞机结构维修问题提供指导，可供航空结构领域从事飞机结构分析、设计和后勤维修及保障人员使用，同时可供该专业范围内的生产、使用部门的技术人员和高等院校师生参考。

由于时间有限、译者水平有限以及其他各方面的原因，本书翻译难免有不足甚至谬误之处，衷心希望批评指正。

鉴于本书对航空结构领域具有重要意义，“十二五”期间，在重点预研课题《长寿命

机翼与机身对接结构可靠性设计与验证》的支持下，中国飞机强度所组织人员对本书进行翻译，期间得到了南京航空航天大学童明波教授、北京航空航天大学关志东教授以及中国飞机强度所郑旻仲、薛景川、王俊安、胡律行等专家的鼎力帮助。

本书的翻译出版得到了航空工业出版社的大力支持，在此表示感谢。

前言

迄今为止，很多国家都面临着飞机老龄化问题，在疲劳裂纹和腐蚀损伤的影响下，飞机中许多结构都失去了其应有的功能，为了保证其结构的完整性，必须采用成熟可靠的技术对飞机结构进行修理。所以，此时介绍金属飞机结构的复合材料胶结修理技术是非常必要的。三十年前，澳大利亚首先提出了复合材料胶结修理老龄金属飞机的概念，至今，这项技术得到了广泛应用，包括澳大利亚、加拿大、英国、美国等。C-141 飞机机翼燃油排放孔周围出现裂纹，当时正是因为应用这项技术，才能维持整个机队的服役。

飞机金属结构复合材料胶结修理的概念并不复杂。在实验室环境下，很容易证实胶结修理降低了裂纹区域的应力，并使得裂纹不再扩展，但是在实际外场环境下，由于其他因素的影响，胶结修理的可靠性并不能很好地得到评估。澳大利亚研究人员认为胶结修理可靠性问题是至关重要的，如果胶结修理在服役飞机上应用失败，那么此项技术就有可能被遗弃。为此，研究人员开发了一种可应用于飞机结构的修理技术，其人员操作熟练程度是关键。一旦修理的实施者具备了所需要的操作熟练程度，且在相应的应用范围内，则修理就会取得成功。

本书由艾伦·贝克博士、弗兰西斯·罗斯博士和莱丝·琼斯教授共同编撰，内容主要为复合材料修理所涉及的主要技术方面。编者与胶结修理领域的专业学者来讨论此项技术多方面的问题；包括材料和工艺、修理设计、取证以及应用的考虑等。这些讨论的深度使读者对于这项技术的基本要素有足够的了解。而为了显示此项技术的应用广度，文中引用了大量的历史应用案例。

飞机金属结构复合材料修理技术有广阔的应用前景，同时具备了成功的要素。当前的应用案例显示此项技术具有良好的可靠性，应用回报也是可观的。另外，此项技术可以在其他方面得到应用，并很有可能开辟新的应用领域。

本书的目的是为读者对这个重要技术的基本要素提供良好的认识。

约翰·W. 林肯 (John W. Lincoln)

美国空军飞机结构完整性技术顾问

鸣 谢

谨以此书献给尊敬的约翰·W. 林肯先生。林肯先生在完成本书前言的几个个月后便与世长辞了。林肯先生在飞机结构适航相关的多个领域均作出了杰出的贡献，此处不再一一赘述。如前言所述，林肯先生对胶结修理技术研究给予了巨大的支持，他本人也曾是一个针对认证问题的国际工作组主席，其相关报告在本书第一章的参考文献中有所引述。

在科学与工程领域，林肯先生是一位难得一见的谦和、友好的伟人。在适航问题，尤其是与美国空军相关的适航研究方面，他是公认的领袖和专家。

作者介绍

艾伦·贝克博士

艾伦·贝克博士是国防科学技术组织 (DSTO)、航空和航海研究实验室、机身与发动机分部、航空航天复合材料结构领域的学术带头人, 澳大利亚墨尔本先进复合材料结构合作研究中心的技术顾问, 澳大利亚科学院技术科学和工程的研究员, 皇家墨尔本理工大学航空航天工程系兼职教授。贝克博士是国际期刊《复合材料 A 部: 应用科学与制造》《应用复合材料》和《胶结和胶结国际期刊》的编委成员

他因在劳斯莱斯先进研究实验室开展的金属基纤维复合材料方面的开创性研究工作而被广泛认可。近期, 他在飞机金属构件中胶结复合材料维修方面的开创性工作再次得到认可, 并因此获得多项奖励, 包括 1990 年因在防御科学中的成就获得的部长奖励。

弗兰西斯·罗斯博士

罗斯博士就职于航空航海研究实验室、机身和发动机分部、国防科学技术组织 (DSTO)、断裂力学领域的研究专家。罗斯博士在断裂力学、无损检测和应用数学方面做出了重要贡献。尤为突出的是其关于胶结修理和相关裂纹桥接模型的广泛研究及在稳定的氧化锆变相增韧理论方面的研究, 在国际上也享有盛名。在新兴的激光超声波领域, 罗斯博士对激光激发超声波的分析也成为其标准参考之一; 同时, 对裂纹涡流检测理论及多裂纹检测也做出巨大贡献。

罗斯博士是《国际断裂》期刊的地区编辑, 也是《材料力学》期刊的编委成员。1987 年, 他在英国的数学及其应用研究所工作; 1994 年, 在澳大利亚的工程研究院工作。目前, 罗斯博士为澳大利亚断裂组的负责人, 并多次参与组织断裂力学和工程数学方面的学术会议, 包括当地的和国际的。他目前工作于澳大利亚研究委员会旗下的 the Engineering Selection Panel, 并兼职数个委员和技术顾问。

莱丝·琼斯教授

1993 年, 琼斯教授进入莫纳什大学, 现为机械工程专业教授, DSTO 专业技能中心的负责人。他在有限元分析、复合材料修理和结构完整性评估的研究广为人知。他是莫纳什铁路技术研究所和莫纳什维修技术研究所的创始人。他积极投身于澳大利亚和海外工业。在维多利亚埃索石油公司工厂事故和北部麦克阿瑟天然气管道线事故中, 他是澳大利亚政府皇家调查委员会力学方面的负责人。

琼斯教授获得过众多奖项, 包括 1982 年的工程杰出奖, 予以表彰其对“幻影”Ⅲ进行复合材料的修理; 澳大利亚乔治·朱利叶斯工程奖章, 予以表彰其对失效分析的贡献; TTCP 奖, 予以表彰其对澳大利亚、美国、英国、加拿大和新西兰防御科学领域复合材料

结构做出的贡献；劳斯莱斯澳洲航空特别奖，予以表彰其在 F-111 中的工作。自 1999 年以来，琼斯教授就是复合材料结构方面的国际会议的负责人。

鸣谢

来自航空航海研究实验室，国防科学技术组织（DSTO）的斯蒂芬·加利亚博士和王春博士对本书的校对和编辑做出了重要的贡献，作者于此表示由衷地感谢。

符号与定义

硼环氧	b/ep	石墨环氧	gr/ep
剪切模量 (应变能释放率)	G	泊松比	ν
特征裂纹长度	λ	裂纹长度	a
应力强度因子	K	脱胶长度 (Disbond length)	b
循环数	N	Paris 指数	n
Paris 系数	A	应力	σ
剪切应力	τ	应变	e
剪切应变	γ	位移	u 或 δ
厚度	t	厚度	t
长度	L	施加载荷	P
宽度	W	单位宽度力	F
弹性剪切应变指数	β	刚度比	S
夹杂因子 (Inclusion factor)	φ	热膨胀系数	α
应力比	R	温度幅值	ΔT
角度	θ		
上下标			
平板	P	塑性条件	p
弹性条件	e	最大值	max
极限值	u	最小值	min
胶结	A	外部胶结	o
温度	T	内部胶结	i
无穷大	∞	允许值	*
临界值	c		
增强	R		

目 录

第1章 绪论与评述	(1)
1.1 本书目的	(1)
1.2 飞机结构的检查与修理类别	(1)
1.2.1 飞机结构的设计与取证	(2)
1.2.2 老龄飞机金属结构件的若干问题	(2)
1.3 修理要求	(4)
1.3.1 修理等级	(4)
1.4 修理方法	(5)
1.5 胶结修理实例	(5)
1.6 复合材料补片与金属补片	(7)
1.7 应用范围	(8)
1.8 胶结和螺钉连接的试验比较	(9)
1.9 研发要求	(11)
1.10 结论	(13)
参考文献	(13)
第2章 材料选择与工程应用	(15)
2.1 引言	(15)
2.1.1 影响黏结的因素	(15)
2.2 补片与增强件使用的材料	(16)
2.2.1 金属材料	(17)
2.2.2 非金属材料	(18)
2.2.3 补片材料的选择	(20)
2.3 胶黏剂体系	(21)
2.3.1 胶黏剂的类型	(21)
2.3.2 胶黏剂的性能	(22)
2.3.3 胶黏剂的选择	(22)
2.4 底胶和偶联剂	(24)
2.5 胶黏剂和复合材料试验方法	(25)
2.6 材料工程考虑	(26)
2.6.1 残余应力	(26)
2.6.2 固化压力与空隙	(27)
2.6.3 挤出的胶带	(27)
2.6.4 智能补片修理	(28)
参考文献	(29)

第3章 表面处理与胶结修理	(30)
3.1 引言	(30)
3.1.1 表面能与浸润	(30)
3.1.2 黏结面加压与胶黏剂固化	(31)
3.1.3 胶结性能	(31)
3.1.4 胶结的标准和环境	(32)
3.2 力学试验	(33)
3.2.1 载荷与破坏模式	(33)
3.2.2 胶结程序和性能的合格鉴定	(33)
3.3 标准试验	(34)
3.3.1 楔子耐久性试验	(34)
3.3.2 断裂力学与劈裂试件	(34)
3.4 胶结耐久性的基本原理	(35)
3.4.1 表面粗糙度与胶结耐久性	(35)
3.4.2 表面水合作用与胶结耐久性	(37)
3.4.3 表面污染与胶结耐久性	(37)
3.4.4 胶结耐久性模型	(38)
3.5 表面准备的要求	(41)
3.5.1 脱脂	(41)
3.5.2 打磨、喷砂或浸蚀	(42)
3.5.3 高能表面氧化层的形成	(43)
3.5.4 偶联剂	(44)
3.5.5 胶结底胶	(45)
3.5.6 干燥	(46)
3.6 胶黏剂的使用	(46)
3.6.1 黏结面厚度的控制要素	(47)
3.6.2 空穴的形成和极小化	(47)
3.7 表面处理的质量控制	(48)
3.7.1 水膜残迹测试	(48)
3.7.2 表面功函数法	(48)
3.7.3 傅立叶变换红外线分光镜	(48)
3.7.4 光学反射率	(48)
3.7.5 过程控制试片	(49)
3.7.6 从业者的教育、技能和标准	(49)
3.8 铝黏结体的表面准备	(49)
3.8.1 工厂的处理过程	(49)
3.8.2 飞机上的酸阳极化及酸浸蚀过程	(51)
3.9 钛黏结体的表面准备	(53)
3.9.1 工厂的处理过程	(54)

3.9.2 飞机上的处理过程	(55)
3.10 钢黏结体的表面准备	(55)
3.10.1 工厂的处理过程	(56)
3.10.2 飞机上的处理过程	(56)
3.11 热固性基体复合材料的表面准备	(56)
3.12 表面准备的近期研究	(58)
3.12.1 胶结的溶胶-凝胶体技术	(58)
3.12.2 胶结的热溶液处理	(59)
参考文献	(59)
第4章 胶黏剂的表征及其数据库	(67)
4.1 引言	(67)
4.2 通用的美国材料试验标准 (ASTM) 与美国军用技术规范 (MIL) 试验 ...	(68)
4.2.1 应力—应变许用值	(68)
4.3 疲劳载荷	(72)
4.4 断裂力学许用值	(72)
4.4.1 静力载荷	(73)
4.4.2 I 型模式	(73)
4.4.3 II 型与混合模式	(73)
4.4.4 疲劳载荷	(73)
4.5 FM73 数据库	(75)
4.5.1 剪应力—应变许用值	(75)
4.5.2 屈服准则	(76)
4.5.3 玻璃化转变温度	(76)
4.5.4 Fick 的吸湿扩散系数	(76)
4.5.5 I 型断裂韧性	(77)
参考文献	(78)
第5章 常规胶结接头的疲劳试验	(80)
5.1 引言	(80)
5.1.1 胶结修理区内的损伤容限区域	(80)
5.1.2 常规设计和认证过程	(81)
5.2 双搭接接头疲劳试件 (DOFS)	(81)
5.2.1 DOFS 的应力状态	(82)
5.2.2 试验方法	(83)
5.2.3 试验结果	(84)
5.3 蒙皮加强片试件	(88)
5.3.1 蒙皮加强片试件的应力状态	(89)
5.3.2 试验方法及结果	(93)
5.3.3 断裂力学方法	(96)
5.4 讨论	(96)

参考文献	(97)
第 6 章 基于断裂力学的胶结修理体系环境影响评估	(99)
6.1 引言	(99)
6.2 材料与试件	(99)
6.2.1 胶结的材料体系和制造	(99)
6.3 试验方法	(100)
6.3.1 试验前环境调试	(101)
6.3.2 试验方法	(101)
6.4 分析	(102)
6.5 结果与讨论	(102)
6.5.1 断裂韧性	(102)
6.5.2 疲劳行为	(103)
6.6 总结	(104)
参考文献	(105)
第 7 章 复合材料修理设计的解析方法	(107)
7.1 引言	(107)
7.2 公式与符号	(108)
7.3 胶结增强件的载荷传递	(110)
7.4 对称修理	(112)
7.4.1 阶段 I：异物模拟	(112)
7.4.2 阶段 II：应力强度因子	(114)
7.4.3 塑性胶层	(116)
7.4.4 有限裂纹尺寸	(117)
7.4.5 有限元验证	(120)
7.5 剪切模式	(120)
7.6 单侧修理	(121)
7.6.1 几何线性分析	(122)
7.6.2 裂纹桥接模型	(125)
7.6.3 几何非线性分析	(126)
7.7 胶层固化形成的残余热应力	(130)
7.7.1 温度分布	(130)
7.7.2 局部加热引起的残余应力	(131)
7.7.3 固化并冷却后的残余应力	(132)
7.7.4 均匀温度变化引起的热应力	(133)
7.7.5 验证	(133)
参考文献	(134)
第 8 章 裂纹胶结修理技术罗斯封闭形式解析解的新近扩充	(137)
8.1 引言	(137)
8.1.1 罗斯使用夹杂物模型建立的应力场	(138)